

## GIS 및 확률모델을 이용한 폐탄광 지역의 지반침하 위험 예측

최종국<sup>1</sup> · 김기동<sup>2\*</sup> · 이사로<sup>3</sup> · 김일수<sup>4</sup> · 원종선<sup>1</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 지구시스템과학과, <sup>2</sup>세종대학교 지구정보공학과 지질재해정보연구실

<sup>3</sup>한국지질자원연구원 지질자원정보센터, <sup>4</sup>한국석유공사

## Prediction of Ground Subsidence Hazard Area Using GIS and Probability Model near Abandoned Underground Coal Mine

Jong-Kuk Choi<sup>1</sup>, Ki-Dong Kim<sup>2\*</sup>, Saro Lee<sup>3</sup>, Il-Soo Kim<sup>4</sup> and Joong-Sun Won<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth System Sciences, Yonsei University, 134, Shinchon-Dong, Seodaemun-Gu, Seoul, 120-749, Korea

<sup>2</sup>Geohazard Information Laboratory, Department of Geoinformation Engineering, Sejong University, 98, Guri-Dong, Gwangjin-Gu, Seoul, 143-747, Korea

<sup>3</sup>National Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30, Kajeong-Dong, Taejeon, 305-350, Korea

<sup>4</sup>Korea National Oil Corporation, 1588-14, Gwanyang-Dong, Dongan-Gu, Anyang-City, Gyeonggi-Do, 431-711, Korea

In this study, we predicted areas vulnerable to ground subsidence near abandoned underground coal mine at Samcheok City in Korea using a probability (frequency ratio) model with Geographic Information System (GIS). To extract the factors related to ground subsidence, a spatial database was constructed from a topographical map, geological map, mining tunnel map, land characteristic map, and borehole data on the study area including subsidence sites surveyed in 2000. Eight major factors were extracted from the spatial analysis and the probability analysis of the surveyed ground subsidence sites. We have calculated the decision coefficient ( $R^2$ ) to find out the relationship between eight factors and the occurrence of ground subsidence. The frequency ratio model was applied to determine each factor's relative rating, then the ratings were overlaid for ground subsidence hazard mapping. The ground subsidence hazard map was then verified and compared with the surveyed ground subsidence sites. The results of verification showed high accuracy of 96.05% between the predicted hazard map and the actual ground subsidence sites. Therefore, the quantitative analysis of ground subsidence near abandoned underground coal mine would be possible with a frequency ratio model and a GIS.

**Key words :** Ground subsidence, Abandoned underground coal mine, Frequency ratio model, Decision coefficient, GIS

본 연구에서는 확률기법인 빈도비 모델 (frequency ratio model) 및 지리정보시스템 (Geographic Information System: GIS)의 공간분석기법을 이용하여 강원도 삼척지역 폐탄광 주변의 지반침하 발생 취약지역을 예측하였다. 지반침하에 영향을 주는 요인들을 추출하기 위해 지형도, 지질도, 쟁내도, 토지특성도, 시추공 자료, 기관측된 침하시자 자료 등으로부터 공간자료를 구축하였다. GIS 공간분석과 확률기법을 이용하여 지반침하의 주요인이 되는 8개의 인자를 추출하였고 관측된 침하시자와 8개 인자와의 연관성을 알아보기 위하여 각각의 결정계수( $R^2$ )를 계산하였다. 빈도비 모델을 적용하여 각 인자의 등급별 가중치를 결정한 후, 이를 중첩 분석하여 지반침하 위험 예측도를 작성하였다. 지반침하 위험 예측도를 기준 침하시자 위치와 비교 검증한 결과 96.05%의 높은 예측정확도를 나타냈다. 이를 통해 폐탄광 지역에서 GIS와 빈도비 모델을 이용하여 지반침하 위험지역을 정량적으로 예측하는 것이 가능하다고 판단된다.

**주요어 :** 지반침하, 폐탄광, 확률 기법, 빈도비 모델, 결정계수, 지리정보시스템

\*Corresponding author: kidong@yonsei.ac.kr

## 1. 서 론

석탄산업의 감소로 수익성이 없는 탄광을 정리하는 석탄산업합리화 사업이 시작된 1989년부터 2005년까지 전국 346개 석탄광 중 338개가 폐광되었다. 이후 폐탄광 지역에서 지반침하, 지하수오염, 토양오염, 산림훼손 등의 광해가 발생되어 사회문제화 되고 있다. 그러나 폐탄광 지역의 광해에 대한 정량적인 예측 및 이를 통한 대책 마련에 관한 국내 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 연구는 폐탄광 지역에서 발생하고 있는 광해 중 도로, 철도 등의 국가기간시설물의 안전성을 위협하고 인명, 가옥 및 시설물의 재산 피해를 초래하는 지반침하에 대해, GIS와 확률기법을 이용하여 지반침하 위험지역을 정량적으로 예측하고 검증하기 위해 수행되었다. 국외의 폐광 지역 지반침하 예측 연구로는, 암반의 강도(intact strength of the rock), 응력장(stress field), 지질구조, 수평강의 깊이, 채광지역의 범위, 단위 광산면적당 채굴부피 등을 이용한 지반침하 가능지역에 대한 예측 기법이 제안된 바 있으며 (Goel & Page, 1982), 채굴 공동의 높이, 채굴폭, 탄층 경사도를 이용하여 지표침하의 영향범위를 예측하는 방법(National Coal Board, 1975), 수정영향함수식(modified influence function)에 의한 지반침하 예측 방법(Shoorey *et al.*, 2000) 등이 발표 되었다. 그러나 이는 유럽지역에서 주로 사용되는 장벽식 채탄법(longwall mining)에 의해 발생되는 연속(trough)형 침하에 대한 예측 방법이다. 국내에서는 복잡한 지질구조 및 다양한 폭과 경사를 갖는 불규칙적인 탄층 분포로 인해 위경사승봉락식 채탄법(slant chute block caving method) 및 중단봉락식 채탄법(sub-level caving method)을 주로 사용하였기 때문에 침하량이 크고 침하곡선이 불연속한 함몰(sinkhole) 형태의 침하가 주로 발생하며, 이에 따라 침하에 영향을 주는 요인도 달라진다. Lee & Moon(1997)은 국내 폐광지역에서 발생한 함몰 형태의 지반침하 사례를 분석하여 지반침하에 영향을 주

는 요인을 시간의 흐름에 따라 구분하여 보고한 바 있다(Table 1).

본 연구의 목적은 GIS 및 확률기법을 이용하여 지반침하가 기관측된 폐탄광 지역에 대해 지반침하 위험지역을 정량적으로 예측하고자 하는 것이다. 이를 위해 다수의 지반침하 현장이 관측된 동경  $129^{\circ}03'00''\sim129^{\circ}04'30''$ , 북위  $37^{\circ}12'00''\sim37^{\circ}13'30''$  사이에 위치한 강원도 삼척시 도계읍 상덕리 일대를 연구지역으로 선정하였다. 이 지역은 구 국일탄광 주변으로 1975년부터 1991년까지 활발한 채탄활동이 계속되었던 곳이다. 탄층은 1매의 상층탄 및 2~3개 하층탄이 존재하고 탄층경사가  $10^{\circ}\sim30^{\circ}$ 로 위경사승봉락식 채탄법이 사용되었다. 평균 탄폭은 1~3 m이고 채굴심도는 4~318 m이다(CIPB: Coal Industry Promotion Board, 2000). 연구지역의 남서측 도로부 및 산지에는 함백산층이 지표에 발달하고 그 하부에는 탄층과 채굴적이 분포하는 장성층이 존재한다. Geological Society of Korea(1999)에 따르면 남한 지역의 석탄 자원은 대부분 무연탄으로 구성되어 있으며, 그 중 85%가 상부 고생대 및 하부 중생대 평안계 장성층군에 분포한다고 한다. 연구지역의 중심에서 동서방향의 트랜드(trend)를 보이며 발달하는 상덕 총상단층(thrust)은 대석회암층군과 함백산층 및 장성층의 경계를 이루며, 용식동굴이 다수 존재하는 대석회암층군의 풍촌석회암층은 완만한 경사를 가진 스러스트 상부, 즉 연구지역 동부의 높지대 구간과 급경사 산사면에 넓게 분포하고 있다 (CIPB, 2000). 연구지역에서는 폐광이 된 1991년 이후 지반안정성 정밀조사가 수행된 2000년 까지 13개소에서 지반침하 징후가 관측되었다. Fig. 1은 개내도와 관측된 지반침하 지역을 표기한 연구지역의 위치도를 나타낸다.

지리정보시스템을 지반침하 예측에 적용한 국내의 연구사례는 매우 드물게 보고되고 있으나, Choi *et al.* (2004)이 인공신경망을 이용한 지반침하예측 및 폐지이론에 의한 함몰형 지반침하예측기법을 개발하였고,

**Table 1.** Factors affect sink-hole type ground subsidence (Lee, J.I. & Moon, H.G., 1997).

Occurrence of Ground Subsidence	Progress	Ground Collapse	→
• Mechanical character of Rock mass	• Flow of ground water	• Mining depth	
• Flow of ground water	• Structure of geology	• Height of cavity	
• Structure of geology (joint, fault, dyke)	• Rate of cubical expansion		
• Caving method	• Rate of mining		
• Rate of caving			
• Back filling			

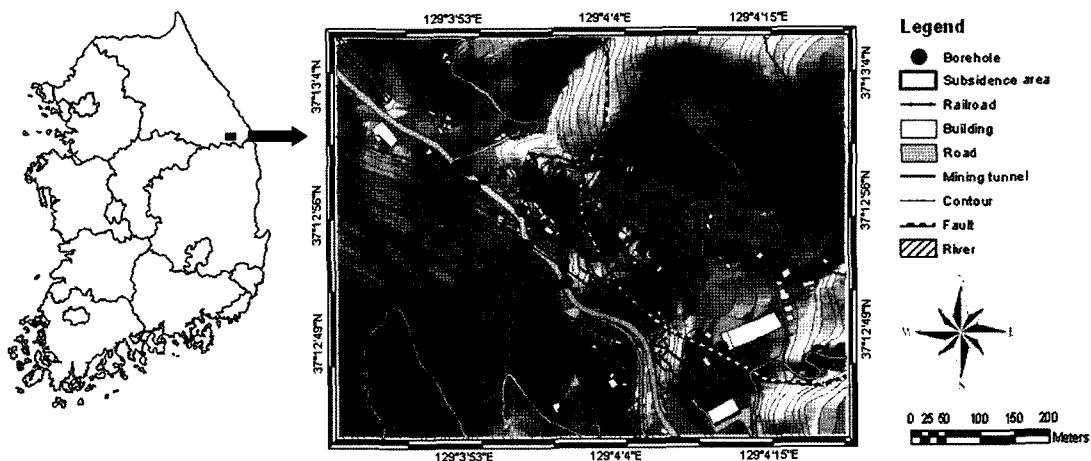


Fig. 1. Study area with mining tunnel and surveyed subsidence sites.

Kim(2005)이 지리정보시스템과 인공신경망 기법을 함께 적용하여 지반침하 위험지역을 예측한 바 있으며, Lee *et al.*(2004)은 산사태 취약성도 작성기법 연구에 지리정보시스템과 화률기법을 적용한 바 있다.

## 2. 연구자료

지반침하와 관련된 국내외 연구에서 탄광주변에서 발생하는 지반침하의 주요인을 채굴공동의 깊이와 높이, 채굴방법, 채굴경사도, 채굴범위, 지질구조, 지하수 심도 및 암석의 물리적 특성인 RMR(Rock Mass Rating) 등으로 규정하여 왔다(Lee & Moon, 1997; Waltham, 1989). 본 연구에서는 국내외 연구에서 제안한 지반침하의 주 요인과 지질, 지형, 지하생도, 지하수 및 암석학적 요인과의 관계를 고려하여 국내 폐탄광 지역의 지반침하 발생에 영향을 주는 요인들을 분

석하고 추출하기 위하여 1:50,000 축척의 지질도, 1:5,000 지형도, 1:5,000 토지특성도, 1:1,200 쟁내도 및 시추공 자료 등 벡터(vector)형식의 공간자료를 구축하였다. Table 2는 각 요인별로 구축된 벡터데이터레이어(layer)를 나타낸다.

연구대상 지역의 지질 자료는 한국지질자원연구원 발행의 1:50,000 수치지질도에서 추출하여 래스터(raster) 형태로 변환하였으며, 연구지역에는 제4기 충적층, 대석회암층군의 풍촌석회암층, 함백산층, 장성층 등 4개의 암상이 존재한다. 또한, 동일 수치지질도에서 추출한 단층에 대해, 단층으로부터의 수평 거리를 1 m 간격의 버퍼링(buffering) 방법을 적용하여 래스터 형태로 구축하였다. 국토지리정보원 발행의 수치지형도에 포함되어 있는 등고선 자료를 이용하여 수치표고모델(Digital Elevation Model: DEM)을 작성하였으며, DEM 자료로부터 지형의 경사도를 계산하여 경사도 네

Table 2. Spatial database of this study area.

Classification	Sub-Classification	Data type	Scale
Ground subsidence	Subsidence area	Polygon shape	-
Topographic map	Contour	Line shape	1 : 5,000
	Road	Polygon shape	
	Railroad	Line shape	
	Building	Polygon shape	
Geological map	River	Polygon shape	1 : 50,000
	Geology	Polygon shape	
Landuse map	Fault	Line shape	1 : 5,000
	Landuse	Polygon shape	
Mining tunnel map	Mining tunnel	Line shape	1 : 1,200
Borehole	RMR(Rock Mass Rate)	Point shape	1 : 5,000
	Permeability	Point shape	

이터베이스를 구축하였다. 국토지리정보원 발행의 토지 특성도로부터 토지이용현황을 추출하여 래스터 데이터 베이스로 변환하였다. 연구지역의 토지이용현황은 8 종류로 분류되었다. 폐탄광에서 발생하는 지반침하는 갱도와 채굴적에 의해 직접적인 영향을 받는 것으로 사료 되어, 본 연구에서는 탄층채굴에 의한 갱도의 지표로부터의 깊이 즉, 갱 심도를 가장 중요한 요인으로 고려하였다. 갱 심도 데이터베이스를 구축하기 위하여 석탄산업협회사업단(현 광해방지사업단)에서 기구축 한 수치갱내도 자료를 사용하였다. CIPB(2004)에 의해 갱내도의 해발고도 보정작업이 이루어진 벡터형태의 수치갱내도를 해발고도 값을 속성정보로 갖는 래스터형태로 변환하여 데이터베이스를 구축하였다. 변환된 래스터 데이터를 지반침하 예측 분석에 이용할 수 있도록  $1\text{m} \times 1\text{m}$  간격의 공간 해상도를 갖는 Ascii GRID 파일로 변환하였다. 최종적으로, 연구지역의 수치지형도로부터 동일한 공간 해상도를 갖도록 계산된 DEM 데이터에서 Ascii GRID 파일로 변환된 갱내도의 해발고도를 뼈째으로써 연구지역 갱내도에 대해 지표로부터의 심도를 계산하였다. 또한, 갱내도로부터 각 갱의 중심선에 대한 지표상 수평거리를  $1\text{m}$  간격 버퍼링 방법으로 계산하여 래스터 데이터베이스로 작성하였다. 연구지역에는 CIPB(2000)에서 수행한 지반안정성 정밀조사 시에 취득한 총 13개의 시추공자료가 존재하나 일부 시추공의 경우 자료가 누락된 것이 있어, 9개 시추공 자료로부터 취득된 RMR 등급 및 8개 시추공 자료로부터 취득된 투수계수 값을 연구지역 전체 범위에 대해 해석하기 위하여 IDW(Inverse Distance

Weight) 내삽법을 사용하여 래스터 데이터베이스로 구축하였다. RMR 등급의 경우 각 시추공에서 심도별로 측정된 등급 중에서 공동 및 단층 상부의 값만을 평균하여 구한 후, 내삽하여 구하였으므로 소수점 이하의 등급 값을 갖게 되었다. 구축된 데이터베이스는 10개의 등급을 갖는  $1\text{m} \times 1\text{m}$  크기의 ArcGIS GRID 형태로 변환하였고, 상관관계 해석 및 지반침하 위험 취약 지역 분석을 위해 Ascii 파일로 변환하였다. 연구지역의 격자 크기는 행과 열이  $694 \times 888$ 개로 총 격자수는 616,272개이다.

본 연구지역의 시추공자료 및 관정 자료를 분석한 결과, 단 2개의 시추공에서만 지하수 심도 값을 구할 수 있었다. 따라서 2개의 지하수 심도 값으로 연구지역 전체에 대해 내삽하여 지하수 심도와 지반침하와의 상관관계를 고려하는데 무리가 있다고 판단되어 본 분석 대상에서 제외하였다. 구축된 데이터베이스에 대하여 GIS의 공간분석 기법과 빈도비 모델을 이용하여 지반침하와 관련된 요인들 간의 상관관계를 분석하였다. 분석 결과 선형 결정계수( $R^2$ )가  $0.8909 \sim 0.0206$ 으로 상관관계가 있는 것으로 나타난 (1)지질, (2)단층으로부터의 수평거리, (3)경사도, (4)토지이용, (5)갱 심도, (6)갱으로부터의 수평거리, (7)RMR, (8)투수계수 등 총 8개의 인자를 지반침하 발생 요인으로 고려하였다 (Table 3).

### 3. 연구방법

빈도비 모델은 지반침하 발생 지역의 분포와 각 지

**Table 3.** GIS database including factors related to ground subsidence.

Category	Referenced Factors	Extracted Factors in this study	Classification of extracted factors
Geology	-	Geology	Alluvium/Great Limestone Group /Jangseong Formation/Hambaeksan Formation
	-	Distance from Fault	10 levels of mining tunnel distance from 0m to 554m
Topography	-	Slope	10 levels from 0 to 76 degree
Land use	-	Land use	8 classes by NGII* in Korea
Mining	Caving method Scope of mining	Depth of mining tunnel	9 levels of mining tunnel depth from 4 m to 317m and 'no data'
Tunnel map	Inclined degree of caving	Distance from mining tunnel	10 levels of mining tunnel distance from 0 m to 309 m
Borehole data	Flow of groundwater RMR (Rock Mass Rate)	Interpolated permeability Interpolated RMR	10 levels from 4.00 to 4.99 10 levels from 3.60 to 4.69

\*National Geographic Information Institute

반침하 요인들 간의 관계를 근거로 이들 간의 상관관계를 밝히고자 하는데 목적이 있다. 이 모델을 이용하여 지반침하 발생 위치와 지반침하 발생에 기여한 요인들 간의 공간적 관계를 유도하고, 이를 통해 지반침하 발생 확률을 계산한다. 이를 위해 연구대상 지역에서 기관측된 지반침하 위치와 범위를 수치화하여 데이터베이스로 작성하고, 지반침하 발생 빈도 및 분포를 계산하는데 이용하였다.

빈도비 모델의 적용을 위해 1 m × 1 m 간격의 격자 형태로 구축된 모든 래스터 데이터베이스를 수치지질

도와 토지이용현황을 제외하고, 각 등급별로 균등한 면적을 유지하도록 10단계의 변위치(quantile) 범위로 재분류하였다. 변위치 분류는 면적을 기준으로 요인의 분포를 분류하는 것으로, 일정 범위안에서 발생한 지반침하 현상에 대하여 각 요인의 등급이 끼치는 영향력을 객관적으로 분석할 수 있도록 하기 위해서 사용된다. 등급별로 일정하게 분류할 수 없는 요인인 수치지질도는 4단계 등급으로, 토지이용현황은 8단계 등급으로 재분류하였다. 각 요인의 전체 격자수에 대한 각 요인의 등급별 격자수의 비율을 구하였으며, 이는 곧 연구지역 전

**Table 4.** Spatial relationship between ground subsidence and related factors.

	Class	Domain	Domain (%)	Subsidence	Subsidence (%)	Frequency Ratio
Geology	Alluvium	32787	5.32	1259	23.94	4.50
	Great Limestone Group	234101	37.99	3474	66.07	1.74
	Jangseong Formation	130611	21.19	525	9.98	0.47
	Hambaegsan Formation	218773	35.50	0	0.00	0.00
Distance from Fault (Buffer, meter)	0-33	60195	9.77	0	0.00	0.00
	33-67	63541	10.31	0	0.00	0.00
	67-103	63130	10.24	422	8.03	0.78
	103-142	61616	10.00	1747	33.23	3.32
	142-184	60849	9.87	1819	34.59	3.50
	184-229	63015	10.23	1270	24.15	2.36
	229-278	60803	9.87	0	0.00	0.00
	278-331	62587	10.16	0	0.00	0.00
	331-389	60410	9.80	0	0.00	0.00
	389-554	60126	9.76	0	0.00	0.00
Slope (degree)	0-5	67345	10.93	2477	47.11	4.31
	5-11	53898	8.75	275	5.23	0.60
	11-15	76154	12.36	664	12.63	1.02
	15-18	62253	10.10	231	4.39	0.43
	18-21	62552	10.15	195	3.71	0.37
	21-25	57375	9.31	352	6.69	0.72
	25-29	78656	12.76	191	3.63	0.28
	29-34	62833	10.20	480	9.13	0.90
	34-41	47362	7.69	233	4.43	0.58
	41-76	47844	7.76	160	3.04	0.39
Landuse	Field	137088	22.24	941	17.90	0.80
	Road	18605	3.02	210	3.99	1.32
	Hybrid Land	98636	16.01	2363	44.94	2.81
	Plot	4441	0.72	30	0.57	0.79
	River	22617	3.67	1608	30.58	8.33
	Grave Yard	162	0.03	0	0.00	0.00
	Rice Field	771	0.13	0	0.00	0.00
	Wood Land	333952	54.19	106	2.02	0.04

Domain: Number of pixels of each class

Domain(%): Domain/total pixels in study area

Subsidence: Number of pixels of subsidence occurrences in each Domain

Subsidence(%): Subsidence/total pixels of subsidence occurrences in study area

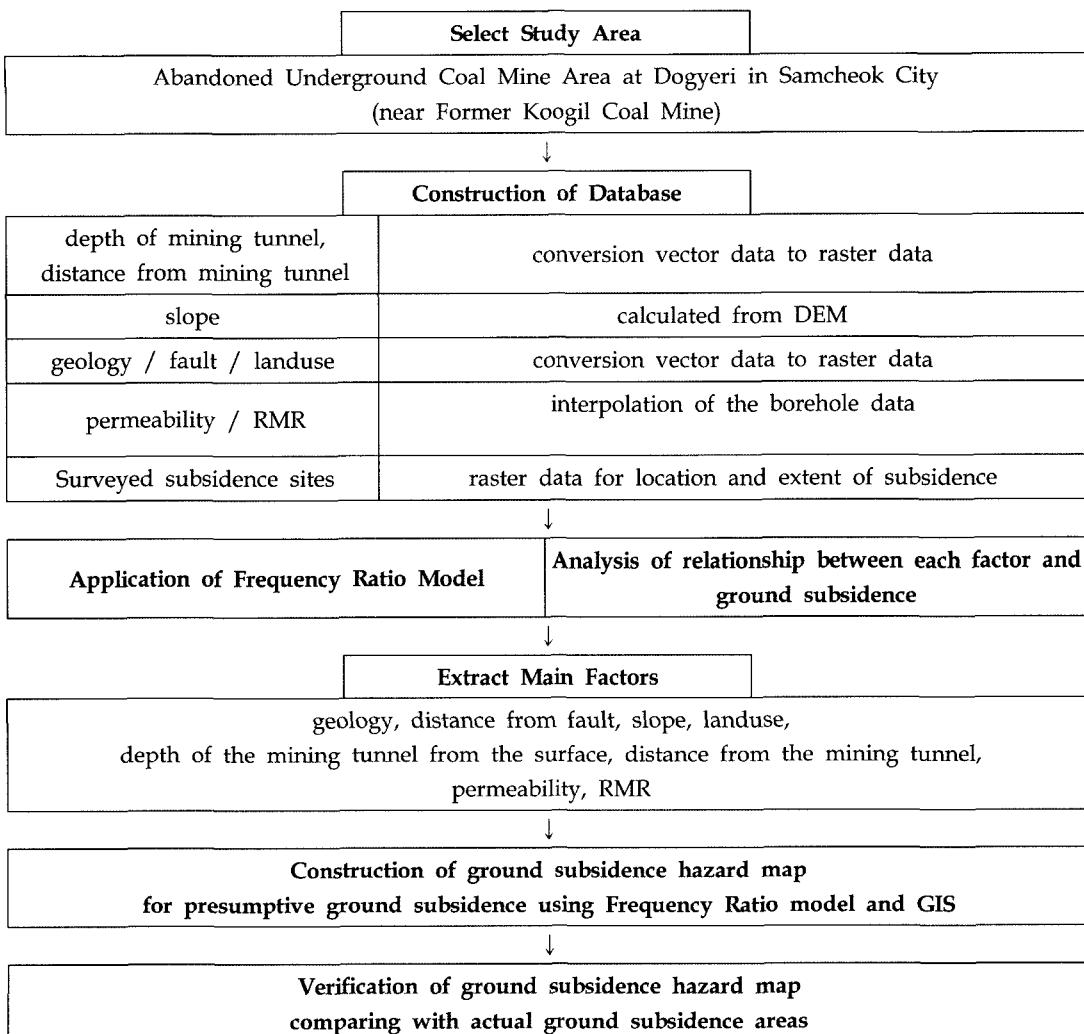
**Table 4.** Spatial relationship between ground subsidence and related factors(Continued).

Class	Domain	Domain (%)	Subsidence	Subsidence (%)	Frequency Ratio
Depth of Mining Tunnel (meter)	4-50	1271	9.07	10	0.19
	50-69	1674	11.94	12	0.23
	69-82	1476	10.53	72	1.37
	82-94	1535	10.95	0	0.00
	94-104	2138	15.25	48	0.91
	104-110	1402	10.00	0	0.00
	111-121	1165	8.31	0	0.00
	121-153	1156	8.25	0	0.00
	153-184	1068	7.62	94	1.79
	184-317	1132	8.08	0	0.00
Distance from Drift (Buffer, meter)	0-3	72562	11.77	1345	25.58
	3-9	60515	9.82	1142	21.72
	9-20	61799	10.03	1238	23.55
	20-38	63086	10.24	1132	21.53
	38-59	61267	9.94	401	7.63
	59-82	60009	9.74	0	0.00
	82-110	59693	9.69	0	0.00
	110-144	59982	9.73	0	0.00
	144-186	59250	9.61	0	0.00
	186-309	58109	9.43	0	0.00
Permeability (grade)	4-4.03	84077	13.64	1850	35.18
	4.03-4.05	62448	10.13	1642	31.23
	4.05-4.07	93458	15.17	0	0.00
	4.07-4.09	88047	14.29	0	0.00
	4.09-4.13	54674	8.87	0	0.00
	4.13-4.19	52956	8.59	43	0.82
	4.19-4.25	47492	7.71	467	8.88
	4.25-4.36	45951	7.46	793	15.08
	4.36-4.44	47730	7.74	140	2.66
	4.44-4.99	39439	6.40	323	6.14
RMR(grade)	3.6-3.66	62977	10.22	1347	25.62
	3.66-3.7	66172	10.74	307	5.84
	3.7-3.73	63177	10.25	130	2.47
	3.73-3.76	62890	10.20	0	0.00
	3.76-3.85	61880	10.04	0	0.00
	3.85-3.97	68938	11.19	0	0.00
	3.97-4.05	64445	10.46	0	0.00
	4.05-4.1	57367	9.31	171	3.25
	4.1-4.19	57581	9.34	2168	41.23
	4.19-4.69	50845	8.25	1135	21.59

체 면적에 대해 각 요인의 등급이 차지하는 면적비율(A)을 의미한다. 또한, 연구지역에서 관측된 전체 지반침하의 격자수에 대해 각 지반침하 관련 요인의 등급별로 관측된 지반침하의 격자수를 계산하여 비율을 구하였으며, 이는 곧 각 요인의 등급에서 발생하는 지반침하의 발생 면적비율(B)을 의미한다. 각 요인들의 등급별 빈도비는 등급별 면적비율로 지반침하 발생 면적비

율을 나눈 것이다(B/A). 빈도비가 1 이면 평균을 의미하고 1 보다 클수록 지반침하 발생과 높은 상관관계, 즉 지반침하 발생확률이 높다는 것을 의미하며, 1 보다 작을수록 낮은 상관관계를 나타낸다. 계산된 지반침하 발생 빈도비 값은 Table 4와 같다.

지반침하 발생과 각 요인들 간의 상관관계를 정량적으로 알아보기 위하여, 각 요인들의 등급변화와 등급

**Fig. 2.** Flow chart of this study.

별 지반침하 발생 빈도비 사이의 결정계수( $R^2$ )를 구하였다. 또한, 지반침하발생 위험도 분석을 위하여 각 요인의 등급에 계산된 빈도비 값을 부여한 후, 8개 요인에 대한 중첩분석을 실시하여 지반침하발생 위험지수를 구하였다. 즉, 지반침하발생 위험지수는 지반침하발생과 각 요인간의 확률적 상관관계인 빈도비 값을 등급별로 부여한 후, 연구지역의 모든 요인에 대하여 격차별로 더한 값이다. 이렇게 계산된 지반침하 위험지수 값을 이용하여 지반침하발생 위험 예측도를 작성하였다. 작성된 지반침하발생 위험 예측도와 연구 지역에서 관측된 실제 지반침하 발생 위치를 나타낸 공간자료를 비교하여 예측 정확도를 검증하였다. Fig. 2는 본 연구 방법의 흐름을 나타낸 것이다.

### 3.1. 상관관계 분석

각 요인들의 등급변화와 등급별 빈도비 사이의 결정계수( $R^2$ )를 구하기 위하여, 각 요인들을 등급별로 1에서 10(지질의 경우 4, 토지이용의 경우 8)까지 단계별로 구분하고 각 요인들의 등급별 지반침하 발생 빈도비와의 관계를 선형으로 계산하였다. Fig. 3에서 그래프의 X축은 각 요인의 등급별 분포값을 10등급으로 나타낸 값이고, Y축은 각 등급별 지반침하 발생 빈도비를 나타낸다. 각 그래프에는 값의 변화 추이를 수식으로 알 수 있도록 선형 추세선을 추가하였으며, 결정계수( $R^2$ )를 함께 표현하였다(Fig. 3). 8개 지반침하 관련 요인 중 개별로부터의 수평거리, 경사도, RMR, 투수계수, 단층으로부터의 수평거리, 개 심도의 순으로

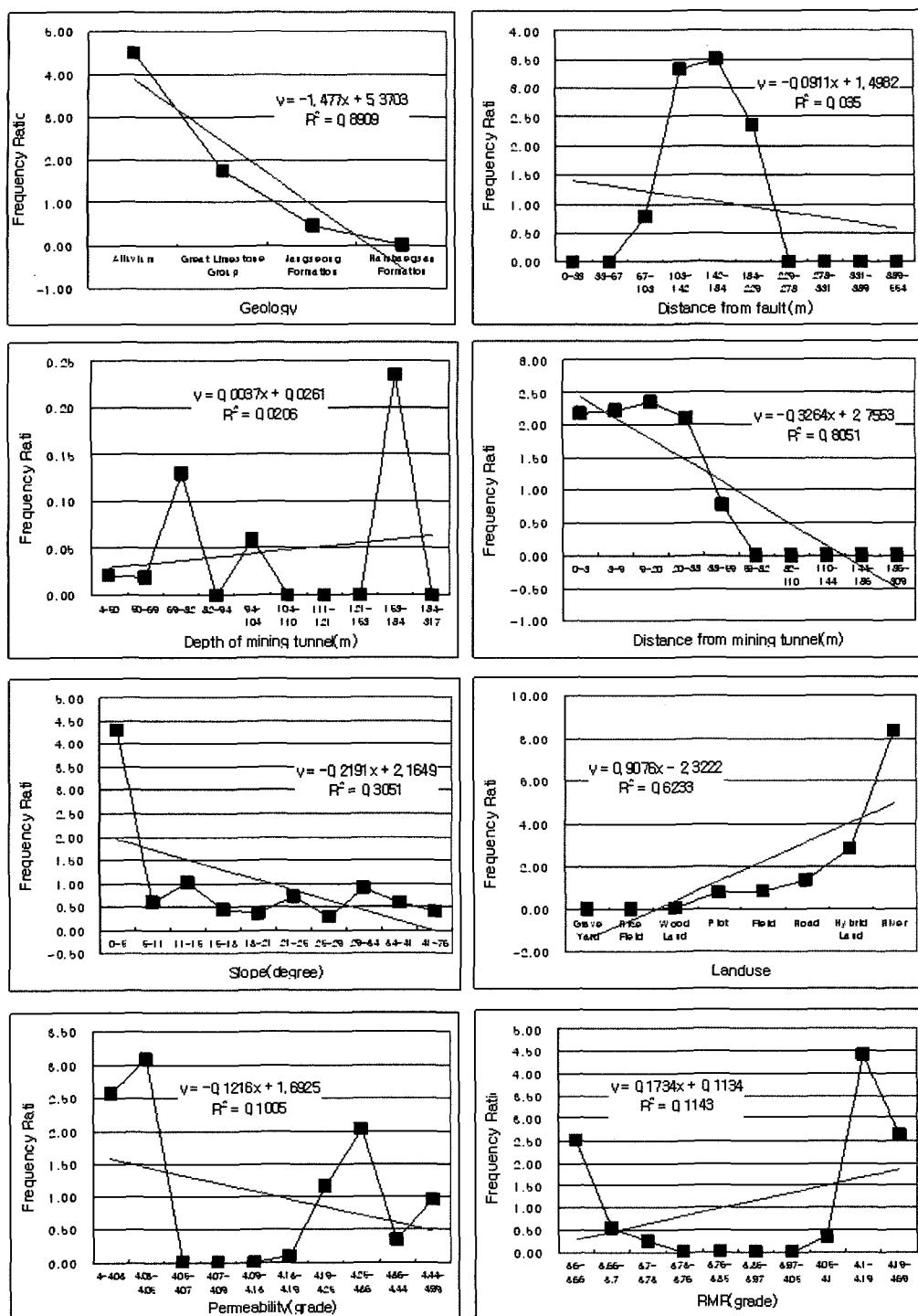


Fig. 3. Spatial relationship between subsidence occurrence and related factors.

결정계수가 높게 나타났다.

갱으로부터의 수평거리는 결정계수가 0.8051로 지반

침하 발생과 매우 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났는데, 이는 지하에 갱이 존재하는 지표주변에서 침

하의 발생 확률이 높다는 것을 정량적으로 나타낸다. 본 연구지역의 경우 갱으로부터의 수평 거리가 60 m를 벗어나는 경우에는 지반침하가 발생하지 않는 것으로 분석된 바, 갱으로부터 거리가 멀어질수록 지반침하 발생 확률이 현저히 떨어진다는 결과를 보여준다. 지반침하 관련 요인 중 지질은 결정계수에 의한 해석 보다는 탄층 상부의 지질 종류와 침하와의 상관성을 고려하여 해석 할 수 있다. 본 연구지역에서 발생한 지반침하 중 장반경 30 m 이상의 상대적으로 큰 규모의 침하는 대부분 풍촌석회암층에서 발생하였으며, 이 지역의 갱심도는 153~184 m이다. 이는 상부 지반이 갱도 및 채굴공동에 의해 직접적인 영향을 받았기보다 침하지 하부에 존재하는 석회공동에 의해 영향을 받은 것으로 판단된다. 이 지역은 파쇄가 심한 상덕 층상단층 하부에 채굴적이 분포하는데, 이 층상단층 상부에 석회공동이 분포하고 하부에 채굴적이 많은 경우 채굴적 직상부붕락은 석회공동의 붕락으로 연결되어 결국은 지표침하 축진에 기여하게 된 것으로 판단된다 (CIPB, 2000). 따라서, 이 지역은 지표 하부의 석회공동 존재여부와 이에 의한 대규모 침하 가능성 등에 대한 정밀조사가 요구된다. 또한, 제4기 충적층에서 발생한 길이 80 m에 이르는 직사각형 형태의 침하지 하부의 갱심도는 70~85 m로 분석되었다. CIPB(2000)에 따르면, 이 지역에는 약 40 m 심도(약 255ML)에 탄층이 존재하고 약 22 m 심도(272ML)에 갱이 존재한다. 그러나, 석탄산업협리회사업단에서 구축한 수치개내도에는 272ML 갱도의 일부가 누락되어 있으며, 이 지역에서 발생한 지반침하는 272ML 갱도에 의한 영향으로 판단된다. 함탄층인 장성층에서는 갱심도가 낮은 60 m 이내에서 대부분의 침하가 발생하였으며, 탄층이 존재하지 않는 함백산층에서는 침하가 발생하지 않은 것으로 분석되었다. 갱 심도와 지반침하발생과의 상관관계 분석결과, 갱 심도가 깊은 곳으로 분석된 풍촌석회암층 지역과 제4기 충적층에서 관측된 침하지역에 의한 영향으로 결정계수는 0.0206으로 낮게 나타났다. 또한 토지이용현황에 의한 분석결과, 하천, 도로, 잡종지, 밭 등에서 주로 침하가 발생되었는데, 도로 주변의 침하는 인명과 재산상의 피해가 발생할 수 있는 곳으로 보강공사와 함께 계측조사를 실시하여 정기적으로 관측하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 경사도는 결정계수가 0.3051로 분석되었다. 연구지역의 경사도는 0~76°의 분포를 보이며, 경사도의 전 분포구간에서 침하가 발생하였으나 0~15°의 완만한 경사를 보이는 곳에서 대부분의 침하가 발생하였다. 이는 기존

의 침하지 조사가 하천, 도로 등 경사도가 낮은 인구 밀집지역에서 주로 수행된 결과로 판단된다.

본 연구지역의 RMR 값은 모두 제4기 충적층과 풍촌석회암층에서 측정되었으며, 시추심도별로 계산된 평균 RMR 값은 3.6~4.69의 분포를 보이고 있다. 침하지역은 RMR 등급이 상대적으로 좋은 제4기 충적층 (3.6~3.7)과 RMR 등급이 좋지 않은 풍촌석회암층(4.0 ~4.69)에서 고르게 관측되는 관계로 결정계수는 0.1143의 낮은 값으로 분석되나, 연구지역 대부분의 RMR 값은 불량한 암반강도를 나타내고 있어 지반침하에 취약한 상태라고 할 수 있다. 투수계수의 결정계수는 0.1005로 낮게 분석되었으나, 투수계수가 4~5등급의 분포를 보이는 본 연구지역 중 4~4.05 등급으로 투수계수가 양호한 지역에서 주로 지반침하가 발생한 것으로 분석되었다. 이는 등급이 양호한 지역이 상대적으로 갱 주변의 지하수 유동성을 좋게 하여 암반의 지지력을 저하시키는 것으로 판단된다. 본 연구지역에는 오십천단층이 장성층 및 함백산층과 풍촌석회암층의 경계를 이루고 있으며, 단층으로부터의 수평거리 67 ~229 m에서 모든 침하가 발생하였다. 단층으로부터의 수평거리와 침하발생의 결정계수는 0.035로 낮게 분석되었으며, 향후 연구지역내의 소규모 단층대의 존재여부와 이에 의한 지반침하발생과의 상관관계에 대한 연구가 수행되어져야 할 것으로 판단된다.

### 3.2. 지반침하발생 위험 예측도 작성

각 요인의 등급에 계산된 빈도비 값을 부여하여 랜더스터데이터로 작성한 후 ArcGIS 프로그램을 이용하여 중첩분석 함으로써 지반침하발생 위험 예측도를 작성하였다. 지반침하발생 위험 예측도의 각 격자에 갖는 값은 각 요인별 빈도비 값의 합이고 이는 지반침하발생 위험 정도를 상대적으로 나타내는 척도가 되며, 따라서 지반침하 위험지수라 표현할 수 있다. 지반침하 위험지수가 높게 나타난 지역은 지반침하 발생 위험이 높다는 것을 의미한다. 지반침하 위험지수 값의 최소값은 1.30, 최대값은 32.78, 평균값은 12.764이며, 표준편차는 6.747이다. Fig. 4는 지반침하 위험지수를 4 단계로 구분하여 표현한 지반침하발생 위험 예측도이다. 계산된 지반침하 위험지수 값을 변위치(quantile) 분류 방법을 사용하여 10개 등급으로 분류하였으며, 이를 다시 시각적 구분이 용이하도록 위험지수 상위부터 1등급, 2~3등급, 4~5등급, 6~10등급의 네 개 등급으로 분류하였다.

### 3.3. 지반침하발생 위험 예측도 검증

지반침하 위험 예측도의 값들은 일종의 통계적 추정(assessment)값에 해당되는데, 예측결과의 정확도를 파악하기 위해서는 검증과정이 필요하다. 예측결과의 검증을 위하여 Lee *et al.*(2004)<sup>[1]</sup> 제안한 추정능력곡선

(Area Under Curve: AUC) 방법을 적용하여, 작성된 지반침하발생 위험 예측도와 연구지역에서 기 보고된 실제 지반침하발생 위치자료를 비교 검증하였다. 추정 능력곡선에 의한 검증은, 지반침하 위험 예측도에서 추출한 연구지역의 지반침하 위험지수 값의 분포와 단위

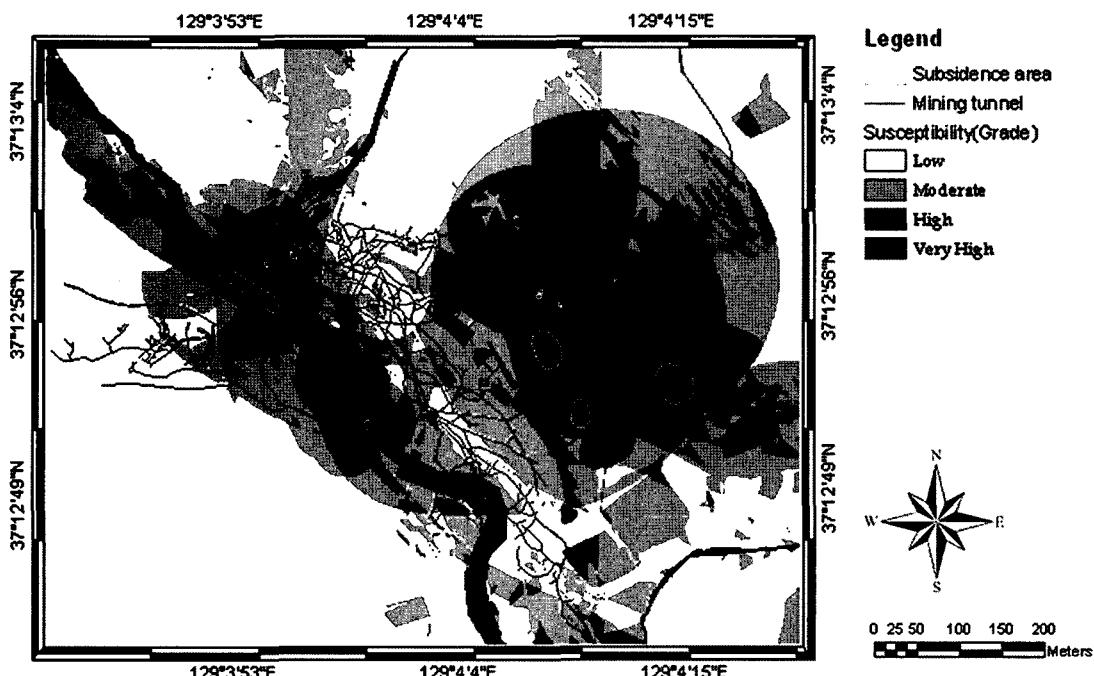


Fig. 4. Ground subsidence hazard map using frequency ratio model.

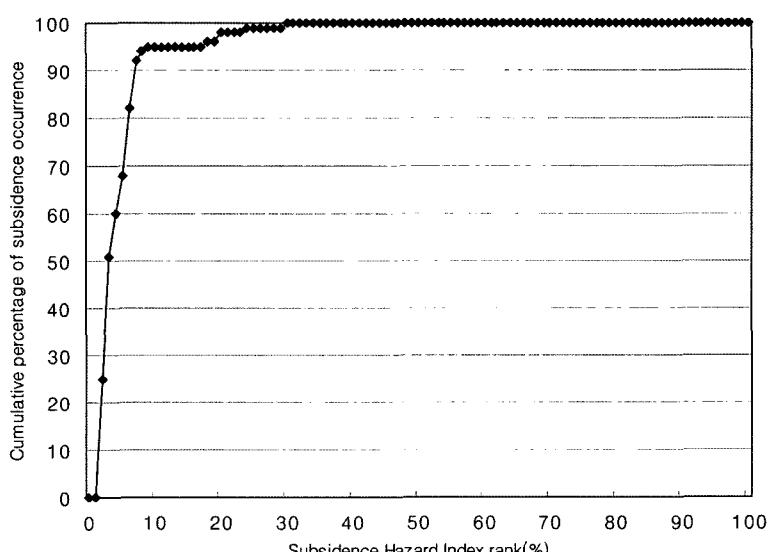


Fig. 5. Area under curve showing ground subsidence hazard rank occurring in cumulative percentage of ground subsidence occurrence.

면적당 지반침하가 발생한 면적의 누적비율 값을 Fig. 5와 같은 그래프로 나타내어 위험지수의 분포와 지반침하의 발생 정도를 보여주는 검증방법이다. 추정능력곡선 방법을 적용하여, 계산된 지반침하 위험지수가 기준의 지반침하 발생을 설명하는 능력을 정량적으로 표현하기 위한 추정능력을 계산하였다. 추정능력을 계산하기 위하여 연구지역의 모든 격자에 대해 계산된 위험 지수 값을 내림차순으로 정렬하고, 정렬된 격자 값들을 누적 1% 간격의 100개 등급으로 분류하였다. 그래프의 X축은 지반침하위험 지수를 상위 1%부터 하위 100% 까지 나열한 것이다. 그래프의 Y축은 지반침하 발생 면적비율을 누적하여 나타낸다. 예를 들어, X축의 값이 1%일 때 Y축의 값이 100%라면 지반침하발생 위험 예측도에서 위험성이 높게 나타난 1% 범위 안에서 실제 모든 지반침하가 발생했다는 것을 의미한다. Fig. 5에서 보듯이 지반침하 위험지수 분포가 높게 나타난 0~10%(상위 10%) 등급에서 연구지역 내 모든 지반침하의 95%가 발생하였고, 0~20%(상위 20%) 등급에서 전체 지반침하의 98%가 발생한 것으로 해석된다.

추정능력곡선은 사용된 모델과 각 요인이 얼마나 지반침하를 잘 예측하였는가를 설명해 주는 것으로 곡선 아래 부분이 차지하는 면적 비율을 추정능력으로 볼 수 있으며, 이것은 곧 예측 정확도를 정량적으로 나타내는 지표로 이용될 수 있음을 의미한다. 분석결과를 정량적으로 표현하기 위하여 곡선 아래의 전체 면적이 1이 되도록 다시 계산하였다. 즉, X축과 Y축을 1:1로 곱하면 그래프 아래 부분의 면적을 구할 수 있는데, 지수값 상위 1%가 지반침하 발생 지역을 100% 포함하는 정사각형을 이룬다고 가정하였다. 여기서 1은 예측 정확도가 완벽하다는 것을 의미한다. 빈도비 모델을 적용한 본 연구 결과 면적비율은 0.9605로 계산되었다. 즉 연구지역에서 빈도비 모델을 적용하였을 경우, 지반침하 위험지역 추정능력은 96.05%라고 할 수 있다. 이것은 매우 높은 예측정확도를 나타내는 것이며 빈도비 모델을 이용하여 지반침하발생을 정량적으로 예측하는 것이 가능함을 보여주는 결과라고 판단된다.

#### 4. 결과 및 토의

폐탄광 지역에서 관측되는 광해 중 지하갱도 및 채굴적에 의한 영향으로 발생하는 지반침하는 국가기반시설, 재산, 인명의 피해를 일으킬 수 있는 위험한 지질재해이다. 이러한 지반침하를 정량적으로 예측하고

관리하기 위해 관련요인을 데이터베이스로 구축하고, GIS와 화률기법을 이용하여 폐탄광 지역에서 발생하는 지반침하의 주요 요인을 추출하였으며 지반침하 발생 위험지역을 예측하였다. 본 연구결과 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 지반침하 발생요인 분석 및 침하 예측을 위해 GIS 분석기법 및 빈도비 모델을 이용하였다. 빈도비 모델은 자료의 입력, 계산 및 결과 해석의 과정이 이해하기 쉽고, 계산된 빈도비 값을 등급값으로 바로 이용할 수 있기 때문에 결과 자료를 다른 형식의 자료로 변환할 필요가 없는 장점을 나타냈다. 또한, GIS 분석기법을 활용하여 다양한 자료를 빠르고 쉽게 처리할 수 있었으며 지반침하발생 위험 예측도를 정량적으로 분석할 수 있는 가능성을 보여줬다.

2. 지반침하 발생에 영향을 주는 주요인별로 지반침하 발생과의 상관관계를 분석한 결과, 본 연구에서 고려한 지반침하 발생 요인 중 개으로부터의 수평거리, 경사도, RMR, 투수계수, 단층으로부터의 수평거리, 개심도의 순으로 결정계수가 높게 나타났다. 개심도와 지반침하발생 사이의 결정계수가 낮게 분석된 것은 연구지역 내 풍촌석회암층에 존재하는 비교적 넓은 침하지역에 의한 것이며, 이는 개도 및 채굴공동에 의한 것인 보다는 침하지 하부에 존재하는 석회공동에 의해 영향을 받은 것으로 판단된다. 따라서, 이 지역은 지표하부의 석회공동 존재여부와 이에 의한 대규모 침하 가능성 등에 대한 정밀조사가 요구된다. 앞선 연구에서 지하수 심도 또한 주요 요인으로 고려되어 왔으므로, 향후 연구지역의 지하수 자료를 최대한 확보하여 지하수 심도가 지반침하 발생에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

3. 계산된 빈도비 값을 이용하여 연구지역에 대한 지반침하발생 위험 예측도를 작성하고, 이를 실제 지반침하가 발생한 위치와 비교 검증한 결과, 96.05%의 매우 높은 추정능력을 보였다. 이는 기관측된 지반침하 지역의 데이터를 이용하여 예측도를 작성하고 검증한 결과로서 정확도 추정상의 한계가 있긴 하나, 빈도비 모델을 이용하여 지반침하를 정량적으로 예측하는 것이 가능하고 그 결과는 신뢰할 만한 수준이라고 판단된다.

4. 지반침하와 발생 요인들 간의 상관관계 분석결과 지하갱도의 분포가 지반침하발생의 중요한 요인으로 판명되었으며, 향후 연구에서는 취득 가능한 채굴적 정보를 구축하고 이와 지반침하 발생 사이의 상관관계 및 채굴적과 지하갱도 간의 상관관계 분석 등의 연구

가 수행되어야 할 것이다. 또한, 본 연구에서 분석된 8 개 요인 이외의 추가적인 요인들을 고려하여 지반침하 발생과의 상관관계를 해석하고 이를 타 폐탄광 지역에 서 적용하여 분석함으로써 폐탄광 지역의 지반침하발생에 영향을 미치는 주요인을 추출하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

5. 본 연구에서 적용된 지반침하발생 위험 예측도 작성 기법의 신뢰도 향상을 위해서는 보다 정확하고 풍부한 현장자료의 취득과 이의 분석이 필요하며, 본 연구지역에 대해 통계기법, 인공신경망 분석기법, 뉴로퍼지 분석 등 추가적인 다양한 분석을 통해 최적의 지반침하요인 추출과 정량적인 예측 기법에 대한 연구가 진행되어져야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- Choi, S.W. (2004) Development of the techniques for reducing the national disaster caused by ground subsidence, KIGAM, report, KR-04-13-5, p. 197-253.
- Coal Industry Promotion Board (2000) Investigation report of the stability test for Dokye. v00-08, p.543.
- Coal Industry Promotion Board (2004) A completion report of Abandoned Coal Mine GIS. 2004-04, p.172-173.
- Geological Society of Koreaa (1999) Geology of Korea, p. 550-556.
- Goel, S.C. and Page, C.H (1982) An Empirical Method for Predicting the Probability of Chimney Cave Occurrence over a Mining Area. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. v. 19, p. 325-337.
- Kim, K.D. (2005) Estimation of Ground Subsidence Near an Abandoned Underground Coal Mine using GIS and Neural Network. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, p. 5283-5285.
- Lee, S.R., Lee, M.J. and Woon, J.S. (2004) Study on Landslide using GIS and Remote Sensing at the Kangneung Area(II) - Landslide Susceptibility Mapping and Corss-Validation using the Probability Technique. Econ. Environ. Geol. v. 37, no. 5, p. 521-532.
- Lee, J.I. and Moon, H.G. (1997) A study on the Mechanism of subsidence over abandoned mine area and the Construction method of subsidence prevention, Coal Industry Promoton Board, 1997, v97-06, p. 1-67.
- National Coal Board (1975) Subsidence Engineer's Handbook, National Coal Board Mining Department, London, p. 111.
- Sheorey, P.R. (2000) Ground subsidence observations and a modified influence function method for complete subsidence prediction, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. v37, p. 801-818.
- Waltham, AC (1989) Ground subsidence, Blackie & Son Ltd, New York, p. 49-97.

---

2007년 2월 26일 원고접수, 2007년 6월 19일 게재승인.